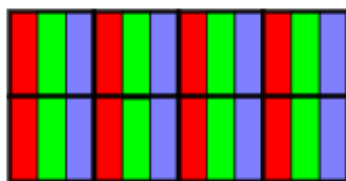


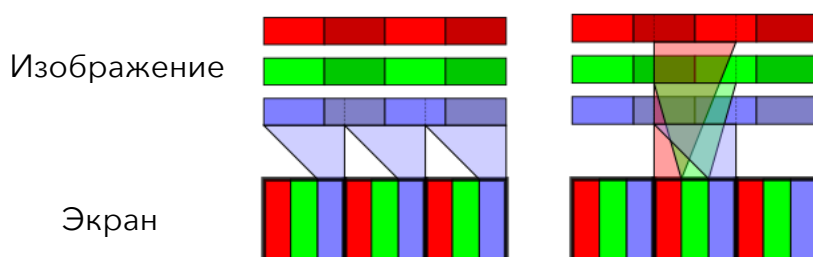
# Пиксель – основа растровой графики

**Пиксель** – это одна из множества точек, составляющих изображение на экране электронного устройства, а также наименьшая единица растровой графики. Термин «*pixel*» происходит от английского выражения «*picture element*» – элемент картинki.

Современные цветные дисплеи используют RGB-схему, в которой каждый пиксель состоит из трех субпикселей красного, зеленого и синего цвета. За счет изменения интенсивности субпикселей можно смешивать три основных цвета и получать миллионы различных оттенков.



Для указания цвета пикселя выделяется до трех байтов данных, по одному байту на каждый основной цветовой компонент. 24-битная цветовая система или «*true color*» использует все три байта. Однако многие цветные системы отображения используют только один байт, что ограничивает отображение 256 различными цветами.



По отдельности пиксели бесполезны – с помощью одного много изображений не нарисовать. Их возможности кроются в количестве.

Таким образом, один из самых важных показателей – это количество пикселей в изображении, что называется **разрешением**. Чем выше разрешение монитора компьютера или экрана телевизора, и, как правило, чем больше пикселей, тем четче и яснее изображение.

Шкала логотипов Сбера – пример ухудшения качества изображения при уменьшении количества пикселей в нем:



Количество пикселей рассчитывается путем умножения горизонтальных и вертикальных измерений пикселей. Например, HD-экран имеет 1920 горизонтальных пикселей и 1080 вертикальных пикселей, что в сумме составляет

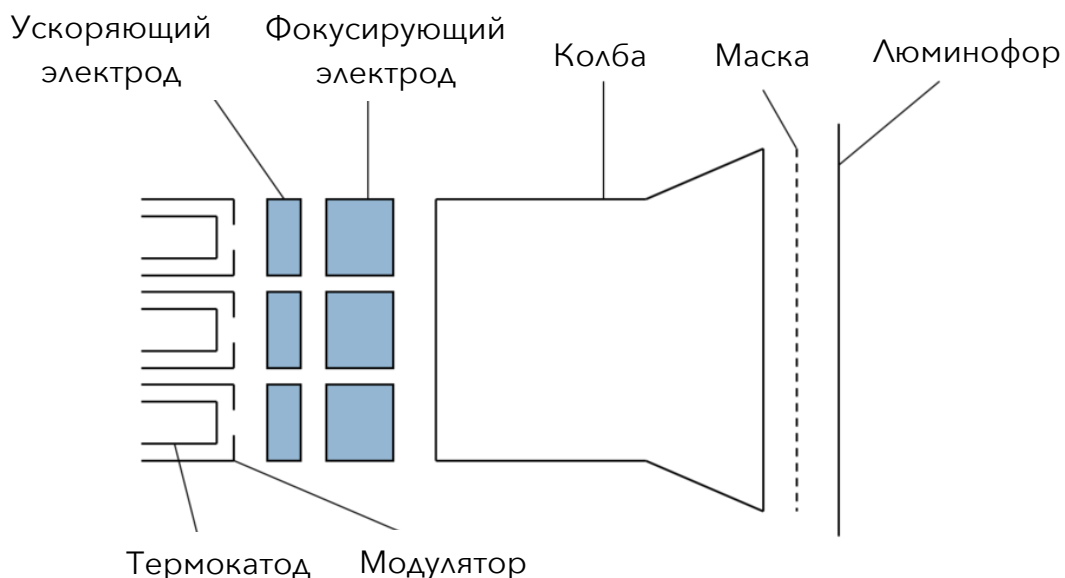
2 073 600. Обычно это отображается как 1920 x 1080 или просто как 1080p, где *p* означает прогрессивную развертку.

## Частота обновления: с чего всё началось

**Частота обновления экрана** – это скорость, с которой дисплей заменяет одну картинку на другую. Независимо от того, смотрите ли вы видео на телевизоре или на смартфоне открыто статичное меню, экран демонстрирует изображения, которые непрерывно сменяют друг друга.

Первоначально, еще в эру первых бытовых телевизоров в качестве стандарта была выбрана частота 60 Гц. На этой частоте работали телекамеры и транслировался телевизионный сигнал NTSC в странах Америки и Азии. Ввиду технических ограничений по полосе пропускания вместо полных кадров передавались сначала только чётные одного кадра, потом нечётные строки следующего кадра: создавалась иллюзия 60 кадров при скорости передачи, соответствующей всего 30 кадрам в секунду. Первые компьютерные мониторы тоже обновляли изображение на частоте 60 кадров в секунду. И это порождало определенные проблемы, непосредственно связанные с особенностями работы применяемых в то время электронно-лучевых трубок (ЭЛТ).

Понятие **частота обновления** изначально было неразрывно связано с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) телевизионного или компьютерного монитора. Ниже представлено схематичное изображение такой трубки:

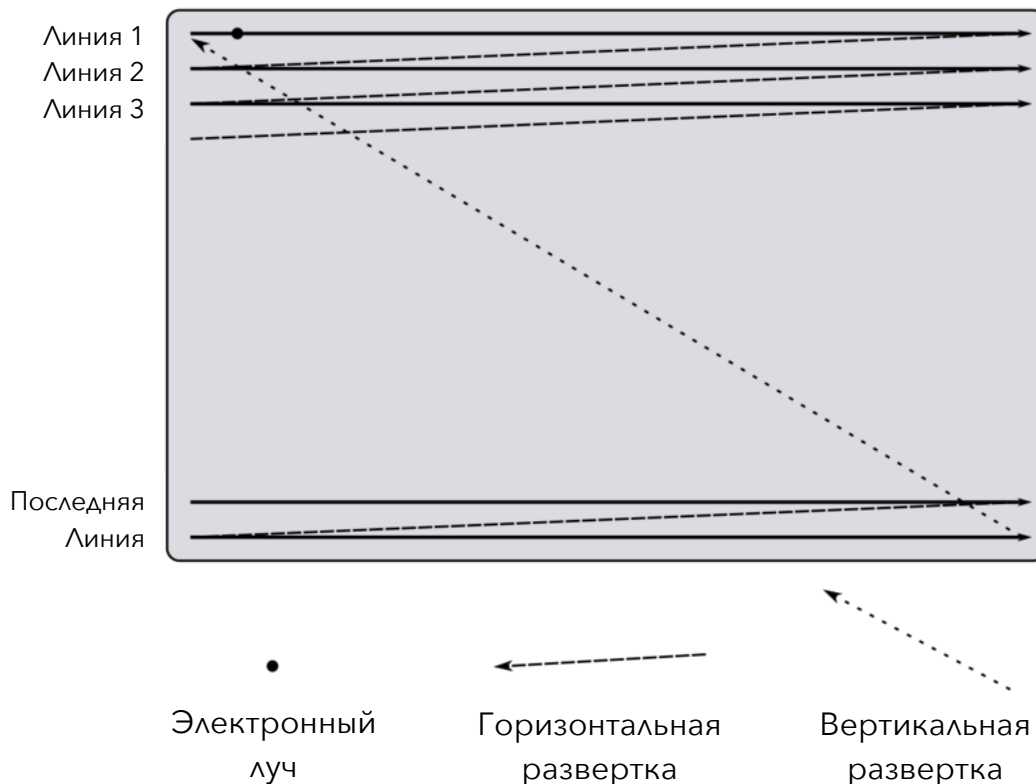


ЭЛТ-монитор представляет собой стеклянную вакуумную трубку, т.е. полость, внутри которой полностью удален воздух. С фронтальной стороны внутренняя часть стекла трубки покрыта люминофором. Люминофор – это вещество, которое испускает свет при бомбардировке его заряженными частицами. Для создания изображения в ЭЛТ-мониторе используется электронная пушка,

которая испускает поток электронов сквозь металлическую маску или решетку на внутреннюю поверхность стеклянного экрана монитора, которая покрыта разноцветными люминофорными точками. Изображение на экране рисуется при помощи сканирования внутренней люминофорной поверхности пучком электронов.

**Если кратко, то это работает так:**

1. Электронно-лучевая пушка испускает поток электронов в сторону экрана.
2. Фокусирующая система собирает поток в луч и направляет его в определенную точку.
3. Электронный луч проходит последовательно по всем точкам экрана слева направо и сверху вниз, формируя изображение, или кадр. Количество возможных изменений изображения в секунду называется **частотой обновления** и измеряется в Герцах (Гц). Модулятор регулирует интенсивность потока в зависимости от требуемой яркости пикселя.
4. Дойдя до конца строки, луч отключается, а фокусирующая система нацеливается на начало следующей строки – это называется **горизонтальная (строчная) развертка**.
5. На последней строке луч поднимается на исходную позицию в первую строку, завершая вывод целого кадра – это **вертикальная (кадровая) развертка**.
6. Пауза между обновлениями называется **интервал гашения**.



У данного метода формирования изображения было много недостатков, среди которых нам будет интересен эффект мерцания. Все дело в том, что свечение зерна люминофора, в которое попал электронный луч, не постоянное – оно

быстро затухает. Фактически по экрану ЭЛТ пробегает быстро гаснущая светящаяся полоса. Но глаз человека обладает определенной инертностью, благодаря которой возникает кратковременная иллюзия полностью освещенного экрана.

На частоте 60 Гц, доставшейся мониторам от телевизоров, колебания яркости экрана, возникающее из-за затухания люминофора, становится визуально заметно. Решать эту проблему за счет увеличения времени послесвечения люминофора нельзя: изображение становится мутным из-за того, что предыдущий кадр не успевает полностью погаснуть к моменту прихода следующего. Поэтому производители компьютерной техники пошли по пути увеличения частоты кадровой развертки. Очевидно, если электронный луч пробегает экран быстрее, то период, в течение которого экран теряет яркость из-за затухания, становится настолько коротким, что человеческий глаз его уже не улавливает. Таким образом, комфортной частотой обновления ЭЛТ-монитора считается 75 Гц, а при 100 Гц эффект мерцания уже становится минимальным.

Жидкокристаллические экраны тоже выводят изображение покадрово, но не используют электронные лучи и люминофор. Жидкокристаллическая панель с активной матрицей представляет собой управляемый фильтр, ячейки которого меняют свои состояния только при смене кадров, а все остальное время сохраняют постоянную прозрачность.

Другими словами, в промежутке между кадрами яркость пикселей не меняется. Какова бы ни была частота обновления, мерцание изображения, подобное возникающему в ЭЛТ-мониторах, принципиально невозможно. Поэтому в большинстве ЖК-мониторов частота обновления зафиксирована на значении 60 Гц, за исключением особого случая, когда нарушается синхронность видеокарты и монитора. Таким образом, при частоте 60 Гц экран отрисовывает 124 миллиона пикселей в секунду! Необходимость быстрой обработки такого количества данных является существенной частью проблемы работы с графикой на аппаратном уровне.

## Вывод изображения на монитор через видеоинтерфейс VGA

**Видеоинтерфейс VGA (Video Graphics Array)** является одним из наиболее распространенных способов подключения монитора к компьютеру. Основными характеристиками VGA являются разрешение и количество передаваемых цветов.

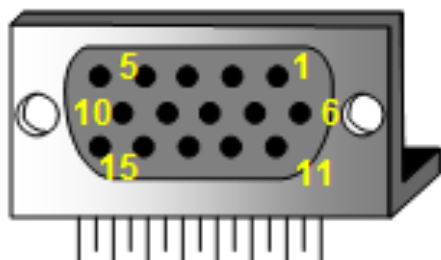
Способы подключения монитора с помощью VGA могут быть различными, в зависимости от возможностей компьютера и монитора. Один из наиболее распространенных способов – подключение к компьютеру с помощью VGA-

кабеля. Такой кабель имеет два конца с разъемами VGA, один из которых подключается к компьютеру, а второй – к монитору.

Кроме того, существуют и другие способы подключения монитора с поддержкой VGA, такие как адаптеры или конвертеры VGA к другим видеointерфейсам, например HDMI или DVI.

Вход VGA имеет множество характеристик, которые определяют его возможности и качество сигнала. Некоторые из основных характеристик включают:

- Разрешение: VGA обычно поддерживает разрешение **640×480 пикселей**, хотя некоторые мониторы и графические карты могут поддерживать разрешения до 2048×1536 пикселей.
- Частота обновления: Вход VGA может поддерживать различные частоты обновления, которые описывают, сколько раз в секунду изображение на экране будет обновляться. Обычно это **60 Гц**.
- Цветовая глубина: VGA может поддерживать различные цветовые глубины, которые определяют количество цветов, которые могут быть отображены на экране. Обычно это **16-бит (65 536 цветов)** или 24-бит (16,7 миллионов цветов).
- Коннектор: Вход VGA имеет 15-контактный разъем, из которых **3 контакта отвечают за видеосигнал**, 4 контакта – за аналоговый звук, а остальные контакты служат для заземления и синхронизации сигнала.



Пин 1: RED	Пин 5: GND
Пин 2: GREEN	Пин 6: RED GND
Пин 3: BLUE	Пин 7: GREEN GND
Пин 13: HSYNC	Пин 8: BLUE GND
Пин 14: VSYNC	Пин 10: SYNC GND

Подключение монитора с VGA входом выполняется с помощью VGA кабеля, подключаемого к соответствующим разъёмам на мониторе и компьютере.

После подключения компьютер передает аналоговый видеосигнал через кабель к монитору. Монитор преобразует этот аналоговый сигнал в видеопоток, который отображается на экране монитора.

## VGA контроллер

Вычислительная часть видеointерфейса VGA обеспечивает монитор пятью различными сигналами: двумя сигналами синхронизации (HSYNC и VSYNC) и тремя цветовыми сигналами (RED, GREEN, BLUE):

Сигнал	Название	Напряжение	Описание
HSYNC	Горизонтальная синхронизация	+5В (+3.3В)	Отрицательный импульс обозначает начало новой строки и заставляет электронный луч перезапуститься на следующей строке развертки экрана
VSYNC	Вертикальная синхронизация	+5В (+3.3В)	Отрицательный импульс обозначает начало нового кадра и заставляет электронный луч перезапуститься на первой строке развертки экрана
RED	Красный видеосигнал	+0В – +0.7В	Интенсивность красного для текущего пикселя
GREEN	Зеленый видеосигнал	+0В – +0.7В	Интенсивность зеленого для текущего пикселя
BLUE	Синий видеосигнал	+0В – +0.7В	Интенсивность синего для текущего пикселя

Сигналы HSYNC и VSYNC определяют разрешение экрана (например, 640x480), тогда как цвет каждого пикселя определяется значением сигнала RED, GREEN и BLUE. Каждый цвет представляет собой комбинацию 3 основных цветов RED, GREEN и BLUE.

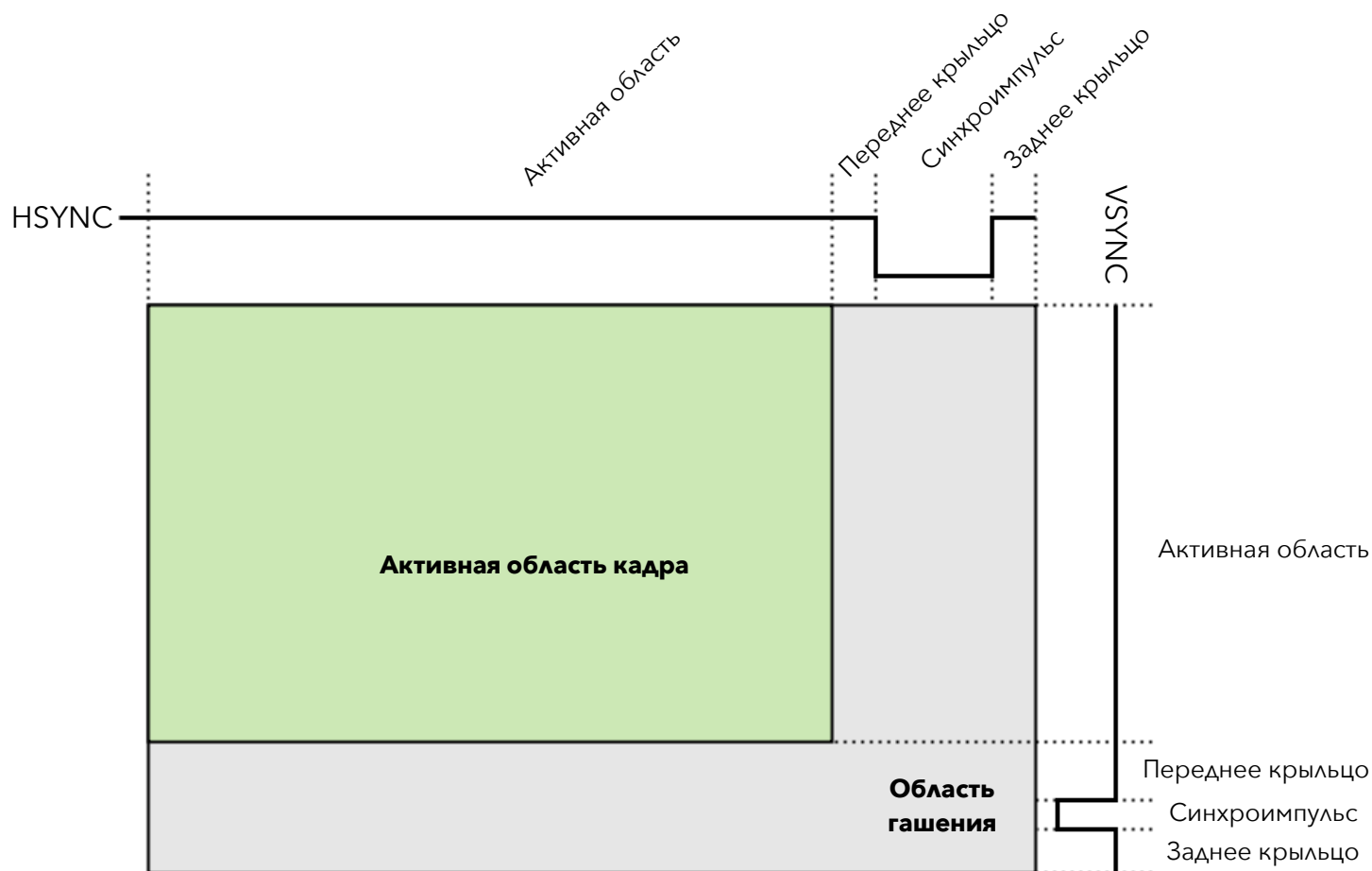
Сигналы HSYNC и VSYNC представляют собой последовательность прямоугольных импульсов +5 В (+3,3 В также подходит), тогда как сигналы RGB принимают значения в непрерывном (аналоговом) диапазоне напряжений от +0 В (абсолютно темно) до +0,7 В (максимальная яркость).

Отдельная точка цвета на видеомониторе не несет много информации. Горизонтальная линия пикселей несет немного больше информации. Но кадр, состоящий из нескольких линий, может представлять изображение на экране монитора. Например, в режиме 640x480 кадр видео VGA имеет 480 линий, и каждая линия содержит 640 пикселей.

Для того чтобы нарисовать кадр, в мониторе есть отклоняющие схемы, которые перемещают электроны, испускаемые пушками, как слева направо, так и сверху вниз по экрану. Эти отклоняющие схемы требуют двух сигналов синхронизации для запуска и остановки отклоняющих схем **в нужное время**, чтобы линия пикселей была нарисована на мониторе, а линии накладывались сверху вниз, формируя изображение.

## Временные характеристики сигналов VGA

Временные характеристики сигналов VGA опубликованы организацией VESA ([www.vesa.org](http://www.vesa.org)). Дальнейшая информация в этой главе приведена в качестве примера для дисплея 640x480 при частоте обновления кадра 60 Гц.



Часть линии / кадра	Горизонтальные пиксели	Вертикальные линии
Общая область	800	521
Активная область	640	480
Переднее крыльцо	16	10
Синхроимпульс	96	2
Заднее крыльцо	48	29
Полярность	отрицательная	отрицательная

Зеленая прямоугольная область является **активной областью кадра** - часть этого кадра, которая фактически будет отображаться на мониторе. Частота обновления составляет 60 Гц, поэтому общее количество пикселей в секунду составляет:  $800 \times 521 \times 60 = 25\,008\,000$ . Следовательно, нам нужна пиксельная тактовая частота 25 МГц, что делает длительность отрисовки каждого пикселя равной 40 нс ( $1/25$  МГц). При этом пиксели отрисовываются только в видимой области!

Одна горизонтальная линия из 800 пикселей занимает  $800 \times (1/25 \text{ МГц}) = 32 \text{ мкс}$ , что составляет около 31,25 кГц, что составляет вертикальную частоту обновления. Полный кадр состоит из 800 пикселей  $\times$  521 строк, это займет  $800 \times 521 \times (1/25 \text{ МГц}) = 16,7 \text{ мс}$ , что составляет около 60 Гц, что составляет частоту обновления экрана или количество кадров в секунду.

Таким образом, для дисплея 640 пикселей на 480 строк с тактовой частотой пикселей 25 МГц и частотой обновления 60 Гц можно получить следующие временные характеристики сигнала:

Длительность отрисовки линии / кадра	Горизонтальные пиксели	Вертикальные линии
Общая область	32 мкс	16,7 мс
Активная область	25,6 мкс	15,36 мс
Переднее крыльцо	640 нс	64 мкс
Синхроимпульс	3,84 мкс	320 мкс
Заднее крыльцо	1,92 мкс	928 мкс

## Протокол VGA

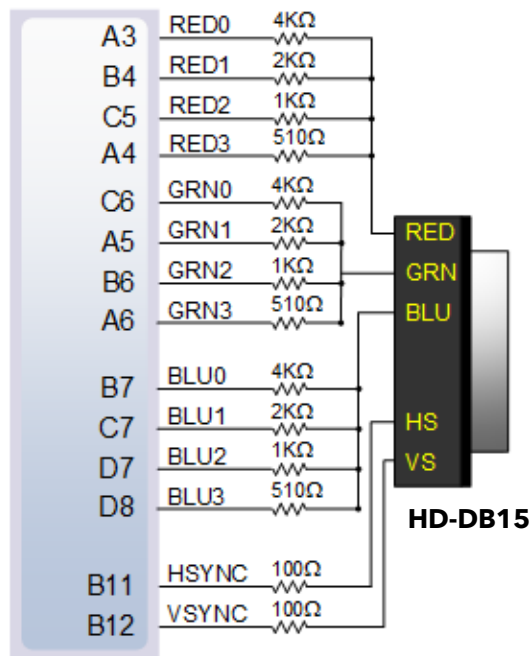
1. Частота пикселей VGA составляет 25 МГц. HSYNC имеет высокий логический уровень в активной области кадра по горизонтали, а VSYNC – по вертикали. Таким образом, высокие логические уровни на HSYNC и VSYNC одновременно определяют активную область кадра. Высокий логический уровень только на HSYNC указывает на нижнюю неактивную область кадра или **вертикальную область гашения**, а на VSYNC – **горизонтальную область гашения**.
2. HSYNC и VSYNC устанавливаются в активное состояние (имеют высокие логические уровни).
3. HSYNC остается в активном состоянии в течение 800 тактов частоты пикселей (т. е. одной строки VGA-дисплея).
4. Для каждого из 800 тактов напряжение на RED, GREEN и BLUE изменяется от 0 до 0,7 В, причем каждое напряжение представляет интенсивность этого конкретного цвета для конкретного пикселя.
5. После 800 тактов сигналы RED, GREEN и BLUE устанавливаются в 0, а HSYNC остается высоким в течение 16 тактов пиксельной тактовой частоты – Front Porch (переднее крыльцо).
6. HSYNC опускается в 0 и остается низким на протяжении 96 тактов пиксельной тактовой частоты – это Sync Pulse (горизонтальный синхроимпульс).
7. HSYNC поднимается в 1 и остается высоким в течение 48 тактов пиксельной тактовой частоты – Back Porch (заднее крыльцо).
8. Затем HSYNC возвращается к началу активной области кадра (шаг 2), и процесс повторяется для следующей строки пикселей. Каждая строка пикселей представляет собой **линию кадра**.
9. VSYNC остается в активном состоянии для 521 линий.
10. После 521 линий напряжения сигналы RED, GREEN и BLUE устанавливаются на 0, а сигнал VSYNC остается высоким для 10 линий – Front Porch (переднее крыльцо).



11. VSYNC опускается в 0 и остается низким для 2 линий кадра – это Sync Pulse (вертикальный синхроимпульс).
12. VSYNC поднимается в 1 и остается высоким для 29 линий кадра – Back Porch (заднее крыльцо).
13. Затем VSYNC возвращается к началу активной области (шаг 2), и процесс повторяется для следующего кадра.

## Как работают цвета? Преобразование цифровых выходов в аналоговые

Для создания сигналов видеоинтерфейса VGA плата Nexys A7 использует 14 сигналов FPGA с 4 битами на цвет и двух стандартных сигналов синхронизации (HS – горизонтальная синхронизация и VS – вертикальная синхронизация).



**Artix-7**

Цветовые цифровые сигналы преобразуются в аналоговое напряжение с помощью схемы резисторного делителя, которые работают в сочетании с 75-омным сопротивлением согласования дисплея VGA для создания 16 уровней сигнала для RGB сигналов.

Схема, показанная выше, создает цветные видеосигналы, которые проходят с равными приращениями между 0 В (полностью выключено) и 0,7 В (полностью включено). Используя эту схему, можно отображать 4096 различных цветов, по одному для каждого уникального 12-битного шаблона. Схема видеоконтроллера должна быть создана в FPGA для управления сигналами синхронизации и цвета с правильной синхронизацией для создания работающей системы отображения.